

# Estudio de la transferencia de agua durante la deshidratación osmótica de zanahoria

**Patricia A. Della Rocca<sup>1</sup>, Luis Alberto Roche<sup>1,2</sup>, Rodolfo H. Mascheroni<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Química, grupo IDETQA, Medrano 951, (C1179 AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> CIDCA, Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología, (CONICET La Plata y Universidad de La Plata), Calle 47 y 116, (B1900 AJJ) La Plata, Pcia. de Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Universidad de La Plata, Facultad de Ingeniería, Modelado y Diseño de Ingeniería de Alimentos (MODIAL) - Unidad de Investigación y Desarrollo (UID)

*patriciadellarocca@hotmail.com*

*Recibido el 02 de agosto de 2013, aprobado el 23 de agosto de 2013*

## Resumen

Se estudió la cinética de deshidratación y la ganancia de sólidos de cubos de zanahoria en solución de sacarosa y sal a una temperatura de 40 °C. Se aplicaron modelos empíricos para describir el proceso de transferencia de agua desde el alimento hacia la solución como los de Azuara, Page y uno teórico, basado en la segunda ley de difusión de Fick, el modelo de Crank. Todos ajustaron los datos experimentales de manera satisfactoria, siendo los dos primeros los que presentaron un mejor ajuste. Se estimó el coeficiente de difusión efectiva del agua y el valor obtenido fue de aproximadamente  $1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , similar a los hallados en la literatura en condiciones análogas.

**PALABRAS CLAVE:** MODELADO DE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA - DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA - DESHIDRATACIÓN DE ZANAHORIAS

## Abstract

The osmotic dehydration kinetic and the solid uptake of carrots cubes in a sucrose-salt solution at a temperature of 40 °C were studied. Empiric models were applied to describe the process of water transfer from the product to the solution. All the models: Azuara, Page and Crank adjust the experimental data in a satisfactory way, being the two first models which adjust better. The water diffusion effective coefficient was estimated and the value obtained was  $1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , similar to that found in the literature in analogous conditions

**KEYWORDS:** OSMOTIC DEHYDRATION MODEL - OSMOTIC DEHYDRATION - CARROTS DEHYDRATION

## Introducción

La deshidratación osmótica (DO) consiste en la inmersión de un alimento sólido entero o en piezas en soluciones acuosas de alta concentración de solutos a un tiempo y temperaturas específicas. Las membranas de los alimentos son semipermeables, entonces, podemos considerar que dos flujos principales a contracorriente se generan: el flujo de agua desde el interior del alimento hacia la solución para intentar equilibrar el potencial químico del agua a ambos lados de la membrana y el flujo de solutos de la solución al alimento. En el modelado, se puede suponer sólo estos dos flujos y considerar despreciable a los efectos de la transferencia de masa relacionado con el flujo de solutos (azúcares, sales minerales, ácidos orgánicos y vitaminas) que son arrastrados desde el alimento a la solución por el agua. Aunque este egreso de solutos desde el alimento puede tener alguna importancia a nivel nutricional u organoléptico.

La solución osmótica debe contener solutos que generen una diferencia de presión osmótica entre el producto a deshidratar y la solución. Entre los solutos más usados por su disponibilidad y por su bajo costo se encuentran la sacarosa y el cloruro de sodio, cuya mezcla presenta un efecto sinérgico. La eficacia de los solutos como agente deshidratantes está en relación con su efecto depresor de la actividad del agua, siendo más eficaces cuando presentan mayores interacciones con el agua y su fracción molar en la solución se incrementa.

Las principales variables que afectan la transferencia de masa son las propias del producto como la composición, el tamaño, la forma, pretratamientos previos y de la solución osmótica como la temperatura, la concentración, la naturaleza del agente osmótico, presión de trabajo, relación de solución-producto, nivel de agitación, presión de trabajo y el tiempo de deshidratación.

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la transferencia de agua durante la deshidratación osmótica de zanahoria y modelar el fenómeno con algunos modelos como los de Azuara y Page y Crank. La no homogeneidad de las estructuras de los productos naturales genera resistencias complejas al proceso de transferencia de masa (Genina Soto, 2005).

En la DO se presentan varios fenómenos físicos

simultáneos: ósmosis, difusión y capilaridad. La capilaridad adquiere importancia cuando en el sistema se producen cambios importantes de presión o temperatura que dan origen al mecanismo hidrodinámico (Fito, 1994; Fito y Pastor, 1994)

El fenómeno osmótico se produce durante la transferencia de agua a través de la membrana celular semipermeable de la hortaliza hacia la solución osmótica manifestándose en transferencia célula-célula, transferencia célula-espacios intercelulares y transferencia celular-disolución (superficial).

La fuerza impulsora responsable del fenómeno osmótico que provoca la transferencia de agua viene dada por la diferencia de potencial químico del agua en las células y en la disolución osmótica. El potencial químico está relacionado con la actividad del agua y con la presión osmótica de cada una de las fases líquidas, en el interior del alimento y en la disolución (ecuaciones 1 y 2) (Chirife, 1982)

$$\mu_w = \mu_w^0 + RT \ln a_w \quad (1)$$

$$\pi = \frac{-RT \ln a_w}{\bar{V}} \quad (2)$$

$\mu_w^0$  = potencial químico del estado de referencia

R = constante de los gases

T = temperatura

$\bar{V}$  = volumen molar del agua pura

$\pi$  = presión osmótica

La fuerza impulsora para los diferentes componentes en el sistema son las diferencias de potencial químico de los mismos en los distintos puntos del sistema. Cuando estas diferencias desaparecen el sistema alcanza el equilibrio y no hay transferencia de materia.

El agua es el componente que difunde mayoritariamente durante el proceso de deshidratación osmótica debido a que su pequeño tamaño molecular y la alta permeabilidad que presentan a ella las membranas celulares.

La velocidad de transferencia de masa varía

durante el proceso de deshidratación osmótica. Al principio, presenta un valor máximo y luego disminuye hasta anularse en el equilibrio, donde la tasa neta de transporte de masa tiende a cero. Con el modelo de Crank se puede estimar el coeficiente de difusividad efectiva del agua y del soluto, pero las suposiciones que implica el modelo no son siempre fáciles de lograr en la práctica, lo que genera importantes limitaciones del modelo (Parjoko et al., 1996).

### Modelo de Azuara

Este modelo fue desarrollado por Azuara y col., (1992) y se basa en el balance de agua en el alimento. Consiste en una ecuación de dos parámetros que puede predecir la cinética de la deshidratación osmótica y el punto final de equilibrio. El mismo se puede estimar utilizando datos obtenidos durante un período relativamente corto de tiempo. Además su aplicación a los datos experimentales no requiere de las dimensiones, la forma, ni la estructura del alimento. Sin embargo, como todo modelo empírico su principal inconveniente es que su validez se limita a las condiciones experimentales para las que se obtuvieron los parámetros.

El balance de masa en el movimiento de agua dentro del alimento es:

$$PA = PA_{\infty} - FA \quad (3)$$

Donde PA es la fracción de agua perdida por el alimento al tiempo  $t$ ,  $PA_{\infty}$  es la fracción de agua perdida por el alimento en el equilibrio (es decir para  $t \rightarrow \infty$ ) y FA es la fracción de agua capaz de difundir hacia el exterior del alimento pero que todavía permanece en el alimento al tiempo  $t$ . En esta ecuación  $PA_{\infty}$  tiene un valor constante para determinadas condiciones de temperatura y concentración inicial. Por otra parte, PA y FA dependen de la velocidad de pérdida de agua y del tiempo. Sin embargo, PA aumenta a medida que estas últimas variables se incrementan, mientras que la FA es una función decreciente de ellas. Esto motivó a Azuara y col. a postular una relación entre PA y FA de la forma

$$FA = PA/k \quad (4)$$

Donde  $k$  es un parámetro que es función del tiempo y de la velocidad de pérdida de agua, simultáneamente.

Asimismo, la velocidad de pérdida de agua es función del tiempo, temperatura y concentración inicial de la solución osmótica. Debido a que la mayoría de los experimentos de deshidratación osmótica se llevan a cabo a temperatura constante y para un dado valor inicial de concentración, se puede suponer que la velocidad de pérdida de agua es solamente una función del tiempo bajo estas condiciones. Basado en estas suposiciones, es posible proponer una función de  $k$  en términos del tiempo y  $S_1$  de la velocidad de pérdida de agua. Para tiempos breves la forma general de esta función será:

$$k = S_1 t \quad (5)$$

donde  $S_1$  tiene unidades de (tiempo)<sup>-1</sup>

Sustituyendo las ecuaciones (4) y (5) en la ecuación (3) queda:

$$PA = PA_{\infty} [S_1 t / (1 + S_1 t)] \quad (6)$$

que es la ecuación fundamental del modelo de Azuara. La misma suele linealizarse y escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{t}{PA} = \frac{t}{PA_{\infty}} + \frac{1}{S_1 PA_{\infty}} \quad (7)$$

En el marco del modelo de Azuara pueden realizarse predicciones para los coeficientes de difusión efectivos. Para ello utilizamos la solución a la ecuación de Crank para tiempos breves de un sistema unidimensional de una placa plana en contacto con una cantidad infinita de solución. La misma se expresa mediante:

$$\frac{PA}{PA_{\infty}} = 2 \left( \frac{D_{efa} t}{\pi a^2} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Donde  $D_{efa}$  es el coeficiente de difusión efectivo del agua,  $efa$  es el valor promedio de los coeficientes de difusión para el rango de concentraciones durante el proceso de difusión y  $a$  es la mitad del espesor de la placa.

Para obtener una expresión para el coeficiente de difusión efectivo en el contexto del modelo de Azuara, trabajando con las ecuaciones (6) y (8) se puede obtener la ecuación (9) que se establece en un régimen de tiempos breves.

$$D_{efa} = \frac{\pi a^2}{4} t \left( \frac{S_1}{1 + S_1 t} \right)^2 \quad (9)$$

Esta expresión crece linealmente con el tiempo para tiempos pequeños, y decae como  $t^{-1}$  para tiempos grandes. En un tiempo intermedio, que llamaremos  $t^* = 1/S_1$ ,  $D_{efa}$  alcanza un valor máximo de  $\pi a^2 (S_1)^2 / 16$ .

La expresión asintótica para  $t \rightarrow \infty$  de  $D_{efa}$ , resulta:

$$D_{efa} \approx \frac{\pi a^2}{4t} \quad (10)$$

Esta expresión se hace independiente de  $S_1$ , ya que este factor no aparece en ella. En este sentido puede considerarse que (10) provee una expresión asintótica promedio que puede usarse para estimar fácilmente órdenes de magnitud de  $D_{efa}$ .

### Modelo de Page

Este modelo plantea una relación directa entre el contenido de humedad y el tiempo de deshidratación y está basado en derivaciones de las ecuaciones de difusión de la segunda ley de Fick.

$$\frac{H}{H_0} = C \exp(k t^n) \quad (11)$$

Boccalatte y Pagano, 2009 emplearon este modelo para representar la cinética de deshidratación osmótica de manzanas bajo condiciones de operación diferentes.

### Modelo de Crank

Consiste en un grupo de soluciones de la segunda Ley de Fick para diferentes geometrías, condiciones límites y condiciones iniciales desarrollado por Crank. Con este modelo se estima la difusividad efectiva ( $D_{ef}$ ) del agua ( $D_{efa}$ ) y la del soluto ( $D_{es}$ ), resolviendo las ecuaciones de forma analítica o numérica. Sin embargo, las suposiciones que se consideran no siempre son fáciles de lograr lo que implica grandes limitaciones.

Consideraciones del modelo de difusión de Fick:

1. El alimento es sólido, homogéneo y uniforme.
2. Se asume que la solución osmótica es un medio semiinfinito; en consecuencia se requiere una relación masa de solución a masa de producto muy grande.
3. Por inmersión del alimento en la solución hipertónica se producen dos movimientos difusivos:
  - a) Difusión del agua del interior del alimento hacia la superficie y posteriormente hacia la solución.
  - b) Difusión de solutos desde la solución hipertónica bien agitada hacia el interior del sólido.
4. Existen soluciones analíticas para láminas planas, cilindros, cubos y esferas. Se emplean técnicas numéricas para resolver formas irregulares.
5. Los parámetros de equilibrio se determinan experimentalmente y por lo general no se alcanza el equilibrio a los tiempos que se consideran en las experiencias.
6. Se considera que no hay efecto de los solutos ganados ni de los solutos perdidos en el proceso de difusión del agua.
7. Se desprecia el encogimiento debido a la transferencia de masa.
8. Se desprecia la resistencia a la transferencia de masa externa. Esta suposición no se puede lograr a bajas temperaturas ni a una alta concentración de soluto en la solución y tampoco si la solución no tiene agitación.
9. Se considera que el único mecanismo de difusión para la transferencia de agua es la difusión, si bien este es el principal también existen otros mecanismos.

Por consiguiente, el uso del modelo de Crank (1975) se convierte en un procedimiento empírico que intenta ajustar los datos experimentales para determinadas condiciones de operación y el coeficiente de difusión efectiva del agua resulta un parámetro cinético fuertemente dependiente de las condiciones experimentales y del método matemático (Salvatori, 1999)

### Determinación de coeficientes de difusión de agua

La segunda ley de Fick para la difusión unidireccional en estado transitorio está dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (12)$$

donde:

C: concentración

t: tiempo

$D_{ef}$ : coeficiente de difusión efectivo o aparente

x: dimensión en la que se produce la difusión, distancia desde el centro de la placa.

Para las siguientes suposiciones y condiciones límites:

$C = C_0$  a  $t = 0$   $-a < x < +a$  donde a es la semiarista del cubo y  $C_0$  es la concentración inicial.

$C = C_1$  a  $t > 0$   $x = \pm a$

donde  $C_1$  es la concentración en el seno del fluido.

La solución de la ecuación cuando se plantea en tres dimensiones para la difusión del agua en los cubos de zanahoria se detalla a continuación, siendo:

S: concentración de sólidos en el producto.

$D_{ew}$ : coeficiente de difusión efectivo del agua.

Los subíndices 0, t y e se refieren a las condiciones iniciales, a cualquier tiempo t y al equilibrio, respectivamente.

$$\frac{(H_t - H_e)}{(H_0 - H_e)} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n^3 \quad (13)$$

$$C_n = \frac{2\alpha(1+\alpha)}{(1+\alpha+\alpha^2 q_n^2)} \quad (14)$$

$$\tan q_n = -\alpha q_n \quad (15)$$

$q_n$  son las raíces positivas no nulas de la ecuación (15)

$\alpha$  es la relación entre el volumen de solución y el volumen del producto.

### Número de Fourier para la transferencia de agua

(16)

En el caso de una geometría cúbica, cuando el número de Fourier para la transferencia de agua es mayor que 0,1, solamente el primer término de la serie en la ecuación (13) es significativo y los demás términos pueden despreciarse. Entonces, las ecuaciones se reducen a las siguientes

expresiones cuando se aplica logaritmo natural a ambos miembros:

(17)

Si se grafican los primeros miembros de estas ecuaciones versus el tiempo de deshidratación empleando los datos experimentales; en ambos casos se obtiene aproximadamente una recta, cuya pendiente y ordenada al origen correspondientes a las ecuaciones anteriores son las siguientes:

Ordenada al origen ecuación (17):

$$3 \ln C_1 \quad (19)$$

Pendiente ecuación (17):

(18)

El valor de  $D_{efa}$  puede determinarse a partir de la pendiente de la recta.

## Parte experimental

### Materiales

La hortaliza utilizada fue zanahoria, la que se lavó, peló y se cortó en cubos de 1 cm de arista. La **zanahoria** es de la familia de las *Umbelliferas*. Es un producto de la temporada de otoño e invierno, sin embargo, se puede disponer de ella fácilmente en cualquier momento del año. La zanahoria representa, después de la papa, el principal tubérculo cultivado en el mundo. Constituye una fuente importante de azúcares, vitaminas (B1, B2, B6 y B12) y  $\beta$ -caroteno (precursor de la vitamina A), con propiedades antioxidantes

Los agentes deshidratantes utilizados para elaborar las diferentes soluciones acuosas empleadas en las distintas experiencias fueron:

Sacarosa: Se utilizó sacarosa comercial, marca Ledesma.

Sal (cloruro de sodio): Se empleó sal fina comercial, marca Dos Anclas.

## Métodos

### Experiencias de deshidratación osmótica

#### a) Descripción

El sistema (zanahoria y solución) se colocó en un vaso de precipitado de 2 L y se agitó a 120-130 rpm en un agitador orbital con controlador de temperatura y una campana acrílica que permite mantener una temperatura constante en el recinto en donde se halla el recipiente.

A intervalos de tiempo de 30 min (para la primera medición) y 60 min para las mediciones posteriores se extrajeron del vaso de precipitado los cubos de zanahoria que se hallaban inmersos en la solución deshidratante. Se los enjuagó con agua destilada para extraer la sacarosa adherida a su superficie y se los secó cuidadosamente con papel *tissue*. Posteriormente, se pesaron para analizar cómo varía la pérdida de peso en función del tiempo. Para elaborar las curvas (pérdida de peso del zapallo en función del tiempo de deshidratación osmótica) se realizaron las correcciones de peso correspondientes por la masa de muestra que se retiró para cada tiempo de medida. Las experiencias se llevaron a cabo por triplicado. El tiempo total de duración de las experiencias de deshidratación osmótica fue de 180 minutos.

#### b) Condiciones de operación

Las condiciones de operación finales obtenidas en las experiencias de deshidratación osmótica fueron:

Concentración de sacarosa: 40% m/m

Concentración de sal: 5% m/m

Temperatura: 40 °C

Relación masa de solución a masa de producto: 4

Tamaño de cubos: 1 cm de arista

Nivel de agitación: 120-130 rpm

#### c) Determinación de humedad de las zanahorias

El contenido de humedad se determinó a través de la pérdida de peso por desecación en estufa. Durante 2 h se las seca a 70 °C y luego a 104 °C por 72 h. En un principio el secado se realiza a menor temperatura para evitar la pérdida abrupta de agua y la pérdida de material por proyección.

d) Cálculo de la humedad (H), la pérdida de peso (PP), la pérdida de agua (PA) y la ganancia de sólidos (GS)

Se calcularon la humedad, la pérdida de peso (PP), la pérdida de agua (PA) ganancia de sólidos (GS) a partir de las siguientes ecuaciones:

$$H(\%) = 100 - TS(\%) \quad (20)$$

$$(21)$$

$$(22)$$

$$\left( \frac{ST_o(\%)}{100} \right) \Big] * 100 \quad (23)$$

Donde: ST son los sólidos totales, m es la masa de producto y los subíndices 0 y f se refieren a inicial y final, respectivamente.

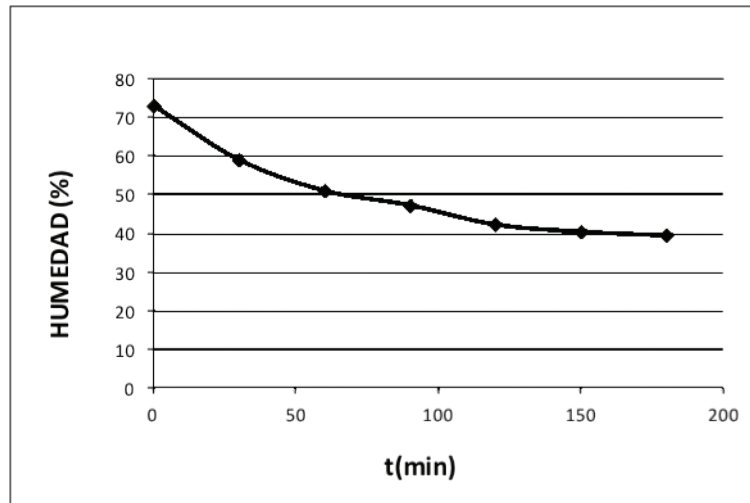
La relación entre la pérdida de peso, la pérdida de agua y la ganancia de sólidos está dada por la siguiente ecuación.

$$PP(\%) = PA(\%) - GS(\%) \quad (24)$$

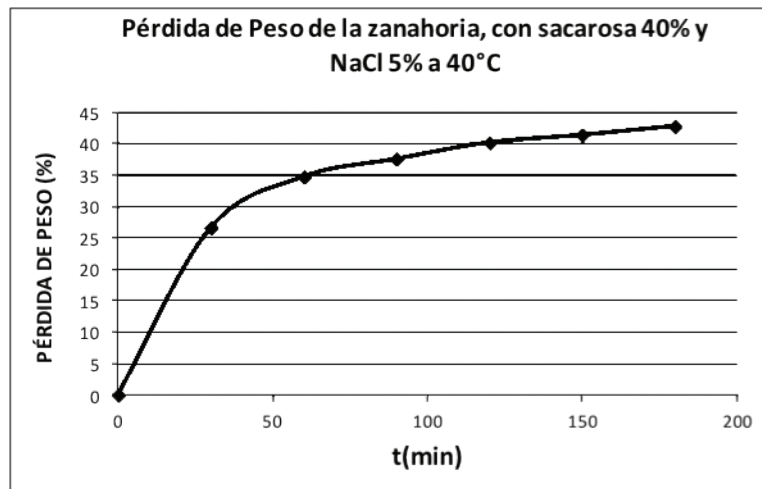
### Análisis de resultados

En la Figura N°1 se representa como varía la humedad en función del tiempo durante la deshidratación osmótica. La humedad disminuye desde el 73 % en base húmeda en la zanahoria en estado fresco hasta el 39,5 % en base húmeda luego de 180 min de deshidratación osmótica. Se alcanza una reducción de la humedad del 46 % respecto de la humedad inicial.

En las Figuras N° 2, 3 y 4 se grafican la pérdida de peso, la ganancia de sólidos y la pérdida de agua en función del tiempo, respectivamente. La pérdida de peso y la pérdida de agua aumentan a medida que transcurre el tiempo de deshidratación osmótica.



**Fig. 1. Humedad de la zanahoria en función del tiempo de deshidratación osmótica**



**Fig. 2. Pérdida de peso de cubos de zanahoria en solución deshidratante con una concentración de sacarosa de 40 % m/m y de cloruro de sodio de 5 % m/m a una temperatura de 40 °C**

**Fig. 3. Ganancia de sólidos de cubos de zanahoria en solución deshidratante con una concentración de sacarosa de 40 % m/m y de cloruro de sodio de 5 % m/m a una temperatura de 40 °C**



**Fig.4. Pérdida de agua de cubos de zanahoria en solución deshidratante con una concentración de sacarosa de 40 % m/m y de cloruro de sodio de 5 % m/m a una temperatura de 40 °C**

**Tabla 1. Valores de los parámetros cinéticos del modelo de Azuara para las experiencias de deshidratación osmótica de cubos de zanahoria en solución de 40 % m/m de sacarosa y 5 % m/m de sal**

En las experiencias de deshidratación osmótica con cubos de zanahoria en solución deshidratante con 40 % m/m de sacarosa y 5 % m/m de sal se obtuvieron los siguientes resultados al aplicar el modelo de Azuara a los datos experimentales, que se presentan en la Tabla 1. El ajuste al modelo se puede observar en la Figura 5.

La pérdida de agua a tiempo infinito calculada con el modelo de Azuara fue del 54,64 % bastante similar a la obtenida luego de 180 min de deshidratación osmótica, 50,4 % pero de menor magnitud ya que a este tiempo seguramente todavía no se ha alcanzado el equilibrio.

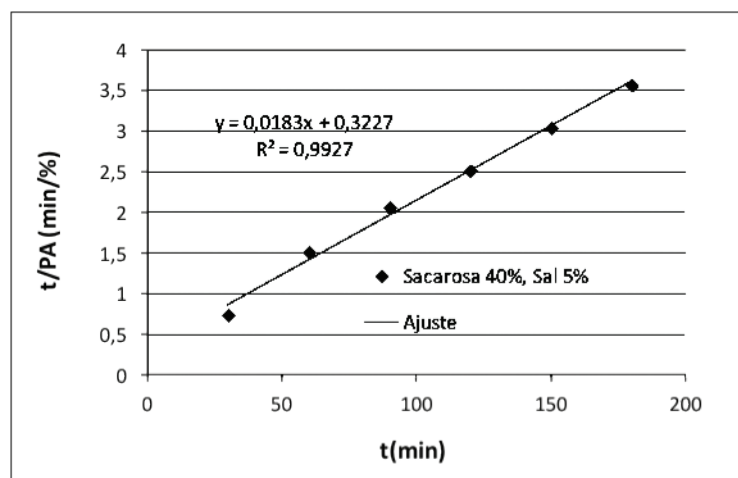
En la Figura 6 se grafica el coeficiente de difusividad efectiva del agua con la ecuación (9), en función del tiempo de deshidratación osmótica, que tiene en cuenta el modelo de Azuara y el de Crank para tiempos breves considerando una lámina plana infinita y difusión unidimensional. Para un tiempo de 180 min y considerando el semi espesor de la placa igual a la semi arista del cubo, el coefi-

ciente de difusión efectiva del agua es de  $1,52 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , muy similar al obtenido con el modelo de Crank considerando la solución de la segunda Ley de Fick para una geometría cúbica y difusión tridimensional ( $1,57 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ), ecuación simplificada (17). También se calculó el coeficiente de difusión efectiva del agua para un tiempo tendiendo a infinito empleando la ecuación (10) pero considerando un tiempo de 180 min y se obtuvo un valor de  $1,81 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . Todos los valores hallados con el mismo orden de magnitud. En la Fig 6 se muestran dichos valores. En ella se ajustaron los valores del coeficiente de difusión efectiva del agua en función del tiempo con una función polinómica de grado 6, cuya expresión se presenta en la figura.

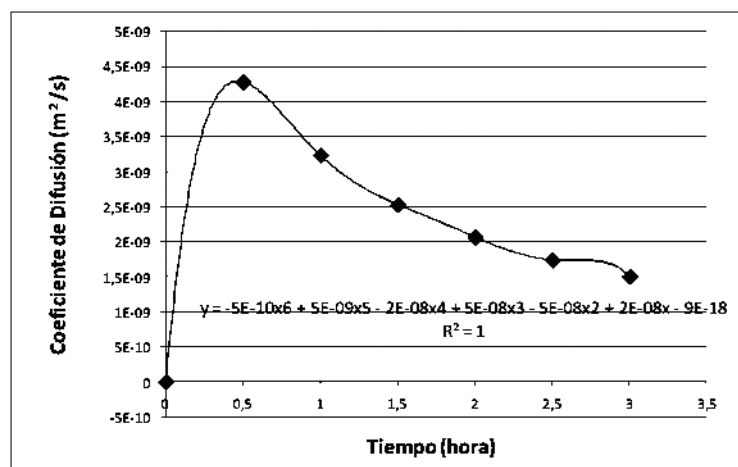
En la Figura 7 se grafican los datos experimentales de la humedad normalizada de los cubos de zanahoria en función del tiempo y el ajuste satisfactorio de los mismos con el modelo de Page, con un valor de  $R^2$  de 0,999.

En la Tabla 2 se presentan los valores de los parámetros de la ecuación del modelo de Page.





**Fig.5. Ajuste del modelo de Azuara a los datos experimentales en la deshidratación osmótica de cubos de zanahoria en solución acuosa de 40 % m/m de sacarosa y 5 % m/m de sal.**



**Fig. 6. Coeficiente de difusividad efectiva del agua en función del tiempo aplicando la ecuación N°9.**

C	K	n	R²
1	0,02849	0,6039	0,999

**Tabla 2. Parámetros de la ecuación de Page**

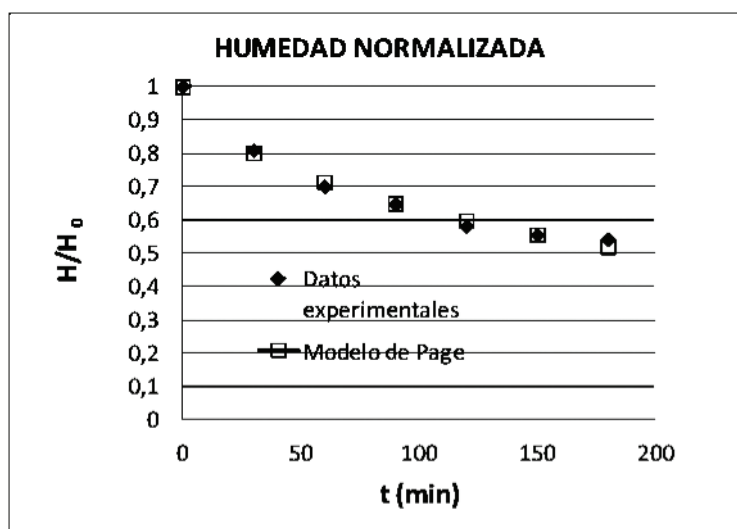
En la Figura 8 se grafica la expresión simplificada del modelo de Crank, ecuación (17). El valor obtenido del coeficiente de difusión efectiva del agua es de  $1,57 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .

En cuanto al ajuste de los modelos a los datos experimentales, el modelo de Azuara ajustó muy satisfactoriamente los datos, mejor que el modelo de Crank. Sin embargo el que ajustó

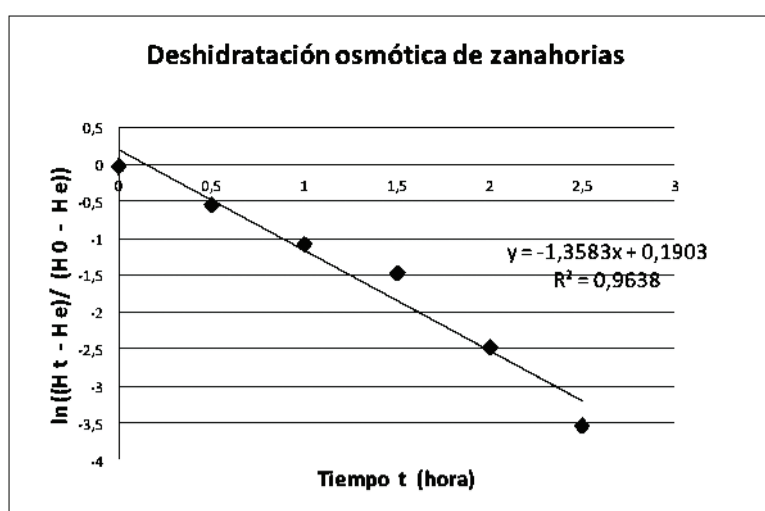
mejor de todos fue el de Page.

## Conclusiones

La pérdida de agua resultó mayor a la ganancia de sólido con lo cual la pérdida de peso fue positiva durante todo el proceso de deshidratación osmótica.



**Fig. 7. Ajuste del modelo de Page a los datos experimentales en la deshidratación osmótica de cubos de zanahoria en solución acuosa de 40 % m/m de sacarosa y 5 % m/m de sal**



**Fig. 8. Aplicación de la expresión simplificada del modelo de Crank, ecuación (17), a los datos experimentales.**

Todos los modelos aplicados (Azua, Page y Crank) ajustaron los datos experimentales de manera bastante satisfactoria en las condiciones consideradas en las experiencias. Los valores de coeficiente de difusividad efectivos del agua resultaron del orden de los obtenidos en la literatura ( $0,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , Melquides et al., 2009).

## Agradecimientos

Se agradece la colaboración de la alumna Micaela Moriconi de la Facultad Regional Rosario de la UTN que colaboró en las mediciones durante el desarrollo de su práctica profesional en nuestra Regional y al Ing. Reynaldo Justino Silva Paz.

## Referencias

- AZUARA, E.; BERISTAIN, C. I. y GARCÍA, H.S. (1992) Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. *International Journal of Food Science and Technology* 29 (4), 239-242
- BELLOCO C. E.; ROCHE L. A.; DELLA ROCCA P. A. y MASCHERONI R. H., (2012) Osmodehidrocongelación de zapallo Anco (Cucúrbita Moschata), IV Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, 14, 15 y 16 de noviembre de 2012, Ciudad de Córdoba, Argentina (modalidad póster).
- BOCCALATTE, F. L. y PAGANO, A. M., (2009) Estudio de la cinética de deshidratación osmótica de manzanas y del efecto sobre la calidad final del producto deshidratado, III Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Córdoba
- CRANK J, (1975) *The mathematics of diffusion*, Second Edition, UK, Clarendon Press.
- CHIRIFE, J., (1982) Principios de la deshidratación de frutas. En: *Anales de la Asociación Química Argentina*, 70, 913-932.
- DELLA ROCCA P.A. y MASCHERONI, R. H., (2011) Papas secadas por métodos combinados y envasadas en atmósfera modificada, XIII CONGRESO CYTAL - AATA. Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos y 4º Simposio Internacional de Nuevas Tecnologías, Buenos Aires 2011.
- GENINA SOTO, P. y ALTAMIRANO-MORALES, S., (2005) Deshidratación osmótica de prismas de camote, manzana y papa, *Interciencia*, 30 (8), 485-487.
- GENINA SOTO, P., (2002) Efecto de la temperatura y la concentración en el proceso de deshidratación osmótica de cubos de camote (*Ipomea batatas*). Tesis. Centro de Investigación y Estudios Avanzados. IPN. México. pp. 24-38.
- FITO, P., (1994) Modelling of vacuum osmotic dehydration of food, *Journal of Food Engineering*, 22, 313-328.
- FITO, P. y PASTOR, R., (1994) Non diffusional mechanisms occurring during vacuum osmotic dehydration, *Journal of Food Engineering*, 21:513.
- MELQUÍADES, Y.; LÓPEZ, C. y ROSAS M., (2009) Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus Carota*) deshidratadas, *Información Tecnológica*, Vol 20, N° 3, La Serena
- PARJOKO, K.A.; RAHMAN, M.S.; BUCKLE, K.A. y PERERA, C.O. (1996) Osmotic dehydration kinetics of pineapple hedges using palm sugar. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 29, 452-459.
- SALVATORI, D., (1997) Deshidratación osmótica de frutas: cambios composicionales y estructurales a temperaturas moderadas. Tesis doctorales., Universidad Politécnica de Valencia.
- SALVATORI, D.; ANDRÉS, A., FITO, P., (1999) Osmotic dehydration progression in Apple tissue I: Spatial distribution of solutes and moisture content. *Journal of Food Engineering*, 42: 125-138.

